

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TERMO-MECÁNICO DEL HORMIGON



K. HOSOKAWA
Arquitecto Técnico
E.T.S. de Edificación U.P.M
Madrid; España
k.hosokawa@upm.es



A. COBO
Dr. Ingeniero Industrial
E.T.S. de Edificación U.P.M
Madrid; España
alfonso.cobo@upm.es

RESUMEN

Las estructuras termoactivas son elementos de construcción que almacenan energía mediante la incorporación de un tubo en el interior de su masa por el cual circula un fluido caloportador. A pesar del éxito de este tipo de instalaciones en países europeos como Austria, Suiza y Alemania, existen dificultades de implantación en otros países, debido al impacto potencial de ciclos de temperatura en el rendimiento geotécnico. Por esta razón, el objetivo del trabajo es estudiar el comportamiento de las estructuras termoactivas a nivel de la resistencia del hormigón. Para ello se ha realizado una campaña de probetas de hormigón a las cuales se han sometido a ciclos térmicos dentro del rango de temperaturas de trabajo de las estructuras termoactivas. Se ha obtenido que el hormigón reduce sus resistencias y deformaciones conforme aumentan los ciclos térmicos, por lo que será necesario tener estos parámetros en cuenta para el dimensionado de las estructuras termoactivas.

1. INTRODUCCIÓN

Las instalaciones de captación geotérmica de baja entalpia, son una manera eficiente y sostenible para la climatización de las edificaciones [1]. La integración de la captación geotérmica en las cimentaciones de los edificios tiene grandes posibilidades de expansión y funcionamiento, ya que el hormigón es un material ideal como intercambiador de calor con el terreno [2]. A pesar de que la tecnología no es reciente, está aumentando el uso de estas soluciones en las edificaciones. La falta de una normativa a nivel internacional, que regule el dimensionado de las estructuras termoactivas, supone un problema por parte de las empresas de control técnico dificultando la implantación de estos sistemas, debido a la falta de conocimiento del comportamiento de las estructuras de hormigón armado bajo cargas termo-mecánicas.

A pesar de que existe una gran cantidad de información en relación a las propiedades del hormigón de cemento Portland bajo incremento de temperatura, la mayoría de los estudios relacionados con este campo caracterizan el hormigón a muy altas temperaturas. De todos los estudios realizados la mayor recopilación de documentación en referencia al estudio del hormigón sometido a incrementos de temperatura lo ha realizado la Comisión Reguladora de la Energía Nuclear en Estados Unidos (U.S.N.R.C.) [3]. Sin embargo, no existe prácticamente documentación que realice un estudio del comportamiento de estructuras de hormigón termo-activadas sometidas a medias temperaturas.

El objetivo de este trabajo consiste en la contribución al conocimiento del comportamiento del hormigón a compresión sometido a ciclos de temperatura, imitando así el proceso de carga y descarga térmica de las estructuras termoactivadas a lo largo de su periodo de servicio.

2. METODOLOGÍA

La hipótesis sobre la que basada el trabajo es el rango de temperatura sobre el cual se encuentra sometido el hormigón de las estructuras termo-activadas, pudiendo variar entre 0°C y 50°C a lo largo de un ciclo anual [4].

Para evaluar el efecto de los ciclos térmicos sobre el comportamiento a compresión del hormigón se han elaborado 23 probetas cilíndricas de hormigón H-25, en una sola amasada, de dimensiones Ø100x200mm, una de ellas conteniendo un termopar tipo K para evaluar la temperatura interior de la probeta.

Se ha procedido a imitar en laboratorio un ciclo térmico anual de un estructura termoactiva, durante los cuales se ha sometido a un rango de temperaturas extremo que varía desde -1°C a 70°C conforme a la Figura 1 y comenzando en un periodo estacional equivalente a otoño (a una temperatura media de 22°C). Los ensayos de rotura se han realizado cada tres meses.

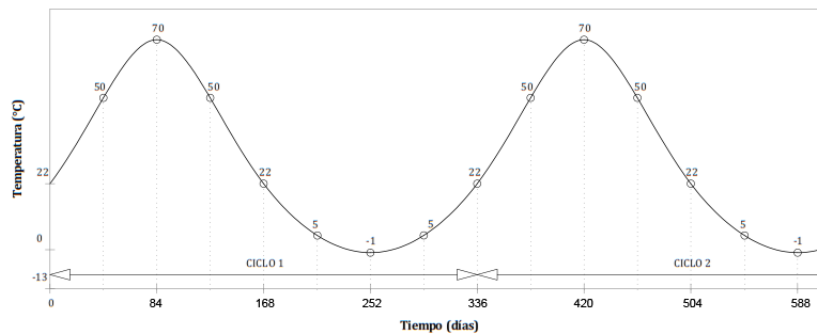


Figura 1: Evolución de las temperaturas de las probetas del ensayo a realizar en función del tiempo.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Diagramas de tensión-deformación

A continuación, en la figura 2 se muestran los diagramas de tensión-deformación de todo el conjunto de datos ensayados a compresión simple, y posteriormente agrupado en función de la temperatura de ensayo

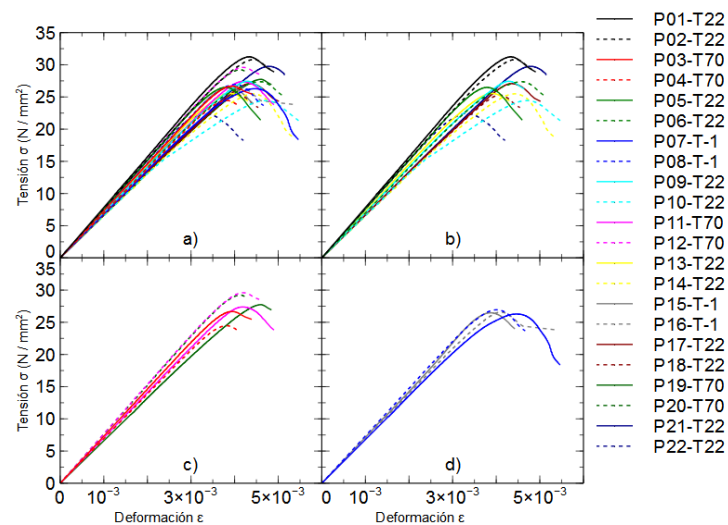


Figura 2: a) Diagrama de tensión-deformación de todas las probetas ensayadas a compresión, b) solo aquellas ensayadas a 22°C; c) las ensayadas a 70°C; d) las ensayadas a -1,0°C

Como se puede observar en la figura 2, los valores de tensiones máximas de todo el conjunto oscilan entre los valores de 22 y 30 N/mm². Los valores de las deformaciones de rotura oscilan entre el 3,3 y el 4,8‰. En general las gráficas observadas carecen de gran variabilidad por lo que es conveniente su agrupamiento. Al agrupar las gráficas por

temperaturas Figura 2 b), c) y d), se vuelve a observar la poca variabilidad de los resultados, no pudiéndose distinguir aquellos realizados al inicio del ciclo de aquellos realizados al final.

4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1 Evolución de las tensiones maximas en función del tiempo.

Si analizamos todo el conjunto de datos (Figura 3 a)), se puede observar una clara reducción del valor de la tensión máxima con respecto del valor inicial, que no llega a recuperarse a lo largo del tiempo. Además la oscilación entre los valores parece indicar una cierta periodicidad de los resultados en función de la temperatura a la cual se han ensayado.

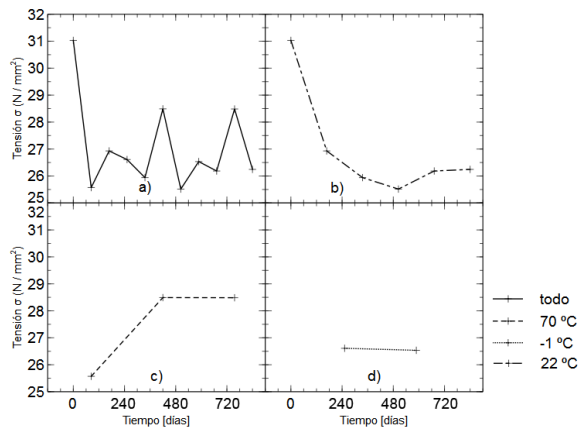


Figura 3: a) evolución temporal de las resistencias medias a compresión de todo el conjunto de datos, b) solo de aquellas que han sido ensayadas a 22°C, c) las ensayadas a 70°C, d) las ensayadas a -1°C

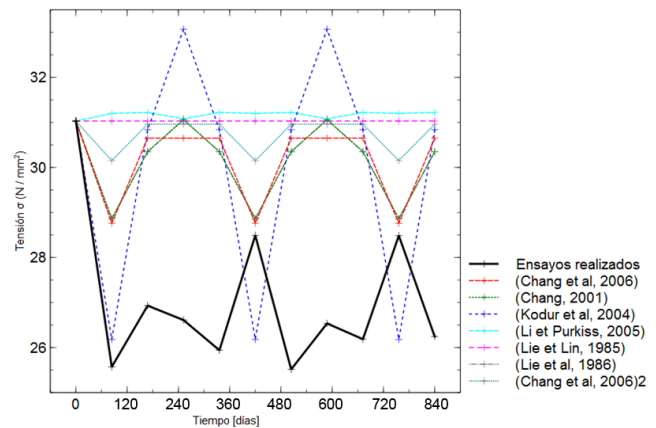


Figura 4: Evolución temporal de las resistencias medias a compresión obtenidas en los ensayos y de varios modelos estimados

Aslani *et al* [5] compilaron diferentes modelos que caracterizan el comportamiento del hormigón a compresión a elevadas temperaturas. Esta recopilación se ha comparado con los resultados obtenidos observándose que para cuatro de los diez modelos propuestos, la resistencia a compresión en estos rangos de temperatura resulta invariable sin embargo, los valores obtenidos difieren hasta en un 17,79%.

Si analizamos los resultados de evolución propuestos por los diferentes modelos y los comparamos con los resultados obtenidos (Figura 4), se constata que los modelos no reproducen la oscilación en las resistencias en función de los ciclos térmicos. Se destacan los valores a 420 y 756 días que corresponden con los resultados de las probetas ensayadas a 70°, y que aumentan de resistencia, mientras que en todos los modelos estos mismos valores disminuyen con respecto de la media. Además los valores de resistencia a compresión de los diferentes modelos no corresponden con los obtenidos experimentalmente por tanto, cabe decir que estos modelos no describen el verdadero comportamiento del hormigón sometido a los ciclos térmicos.

Si analizamos los datos separándolos por la temperatura en el cual se han ensayado (Figura 3), se puede observar la evolución de las tensiones en función del tiempo teniendo como único factor los ciclos térmicos a los cuales se han sometido.

La Figura 3 b) representa la evolución temporal de los valores de tensión máxima media de las probetas ensayadas a 22°C. Se observa una clara tendencia negativa que parece recuperarse a partir del día 672 de ensayo, y se estabiliza hasta el final. Esta disminución de las resistencias a compresión, es más acusada en el inicio del ensayo. Por tanto se podría decir que la resistencia a compresión de las probetas de hormigón ensayadas a 22°C y sometidas a ciclos térmicos, sufre una grave disminución una vez que se somete a cargas térmicas, para posteriormente seguir disminuyendo de manera más paulatina hasta estabilizarse en un valor cercano a los 27 N/mm². Esta disminución representa un 12,9% de la resistencia a compresión.

Si analizamos la evolución temporal de la tensión máxima de las probetas ensayadas a 70°C (Figura 3 c)), se muestra una tendencia opuesta a la observada anteriormente. Se aprecia un ascenso de un 10,23% de las resistencias a compresión en función del tiempo, aunque si bien es cierto que existe una estabilidad a partir del día 420 de inicio de los ciclos térmicos.

Si observamos la gráfica del comportamiento de las tensiones máximas medias, de las probetas ensayadas a -1°C (Figura 3 d)), se observa una estabilidad, por lo tanto parece que los ciclos térmicos no influye en el comportamiento de las tensiones del hormigón cuando son ensayados a una temperatura de -1°C.

4.2 Evolución de las deformaciones de rotura en función del tiempo

En la Figura 5 a) se representan los valores en función del tiempo de las deformaciones de rotura de las probetas ensayadas. Una vez más, se aprecia claramente unos valores oscilantes de la deformación en función del tiempo, que parece indicar que existe una cierta periodicidad. La diferencia observada entre el valor inicial y el mínimo representa un 11,6% menos de deformación.

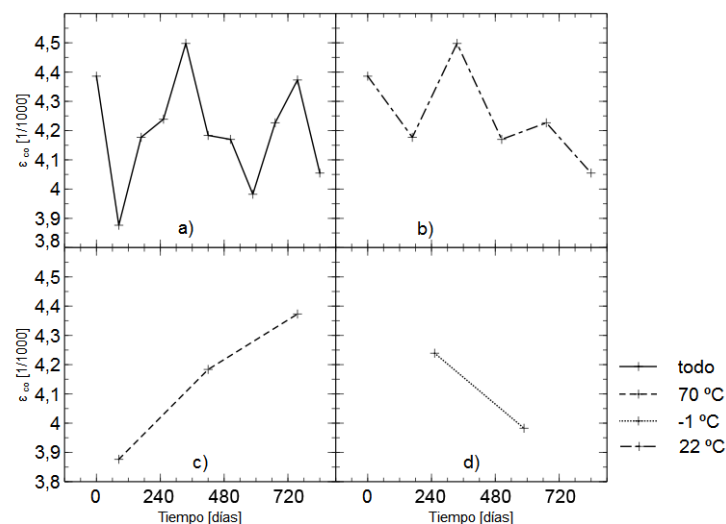


Figura 5: a) evolución temporal de las deformaciones medias de rotura en todo el conjunto de datos, b) solo de aquellas que han sido ensayadas a 22°C, c) las ensayadas a 70°C, d) las ensayadas a -1°C

Al agrupar los valores obtenidos de deformación de rotura por las temperaturas de ensayo, se muestran las tendencias de los valores de deformación en función de los ciclos térmicos.

La Figura 5 b) que representa los valores de deformación de rotura a una temperatura de ensayo de 22 °C, se observa una gráfica igualmente oscilante difícil de interpretar, si bien es cierto que la tendencia general marcada es descendente. Puede que exista una cierta evolución negativa de la deformación en función de los ciclos térmicos.

Sin embargo para los ensayos realizados a 70°C (Figura 5 c)), se aprecia una clara tendencia ascendente, por lo que las deformaciones aumentan a medida que es sometido a ciclos térmicos. Al contrastar esta grafica con la de resistencias a compresión máximas, se observa que ambos aumentan tanto sus resistencias como sus deformaciones con el paso de los ciclos térmicos.

Inversamente a los ensayos realizado a 70°C, la deformación de rotura parece disminuir con el tiempo cuando las probetas son ensayadas a -1°C (Figura 5 d)).

Se puede decir que los valores de las deformaciones de rotura, varían en función de la temperatura en la cual se ha realizado el ensayo. La evolución de los resultados ensayados a 22°C muestra una tendencia negativa. Sin embargo para los ensayos a 70°C muestran un comportamiento similar a los ensayos a compresión, obteniéndose una evolución positiva con un incremento de las deformaciones de un 4,65%. Para los ensayos a -1°C la tendencia a diferencia de los valores de tensión, es negativa por lo que las deformaciones de rotura disminuyen con los ciclos térmicos.

4.3 Evolución de las deformaciones últimas en función del tiempo

El perfil de la evolución de las deformaciones últimas (figura 6) , es similar al obtenido en las deformaciones de rotura. Al agrupar los valores de deformación ultima en función de la temperatura al cual se hizo el ensayo, se observa tendencias similares a las observadas anteriormente. Este paralelismo entre los resultados de las deformaciones ultimas y las de rotura, muestran que no es apreciable una variación significativa del periodo del fluencia del hormigón en función de los ciclos de temperatura.

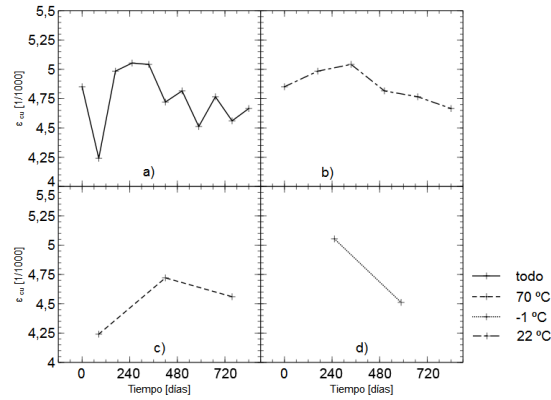


Figura 6: a) evolución temporal de las deformaciones medias ultimas en todo el conjunto de datos, b) solo de aquellas que han sido ensayadas a 22°C, c) las ensayadas a 70°C, d) las ensayadas a -1°C

4.4 Evolución del módulo de elasticidad en función del tiempo

Tal y como muestra la Figura 7 el módulo de elasticidad evoluciona negativamente en función del tiempo, observándose una reducción global del 8,02% desde el inicio de los ciclos térmicos.

El valor del módulo de elasticidad del hormigón, es un valor que evoluciona con la edad del hormigón y que la Instrucción del Hormigón Estructural [6] propone el siguiente modelo de estimación en su artículo 39.6:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{u,3} \cdot E_{cm} \quad (1)$$

Siendo:

$E_{cm}(t)$	El módulo de deformación a los t días.
E_{cm}	El módulo de deformación a la edad del hormigón de 28 días.
$f_{cm}(t)$	Resistencia media a compresión a los t días.
f_{cm}	Resistencia media a compresión a los 28 días.

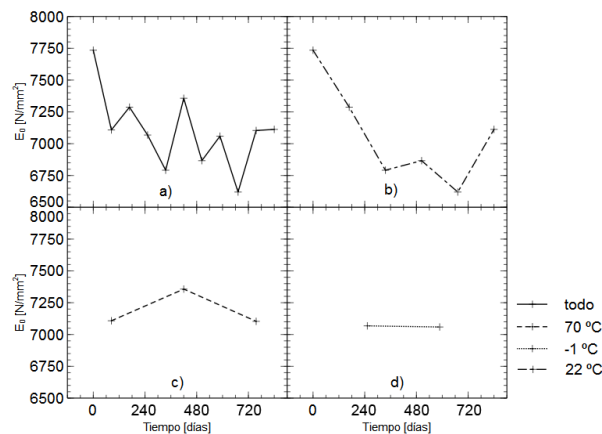


Figura 7: a) evolución temporal del módulo de elasticidad en todo el conjunto de datos, b) solo de aquellos que han sido ensayados a 22°C, c) los ensayados a 70°C, d) los ensayados a -1°C

En nuestro caso, el valor de resistencia media a compresión a los 28 días es el correspondiente al inicio del ensayo, por lo que ese valor corresponde a 7,735 MPa.

El valor del módulo de deformación la edad del hormigón de 28 días se puede calcular mediante la fórmula extraída del artículo 39.6 y es la siguiente:

$$E_{cm} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2)$$

El valor de la resistencia media a compresión a los t días se puede estimar según la fórmula del artículo 31.3 y es:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (3)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left[s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right) \right]} \quad (4)$$

A partir de la siguiente formulación se puede ver la evolución del módulo con respecto de la edad del hormigón, y se compara con la evolución obtenida cuando las probetas son sometidas a ciclos térmicos (Figura 8).

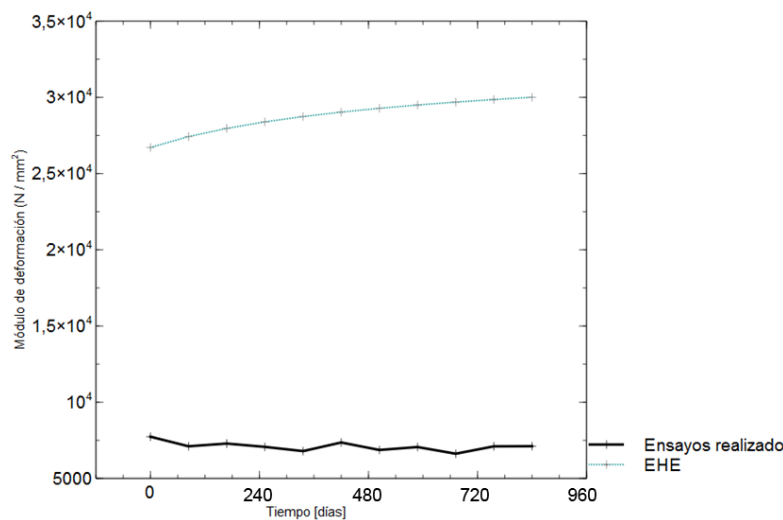


Figura 8: Comparativa de la evolución del módulo de deformación obtenido bajo cargas térmicas frente al modelo de la EHE-08

Se observa que una gran diferencia entre los valores estimados y los valores obtenidos del módulo de deformación. Además las tendencias observadas en función del tiempo son opuestas. Los ensayos muestran una tendencia general negativa, disminuyendo los valores del módulo de deformación. Por tanto el modelo descrito por la EHE no puede adaptarse al comportamiento de las estructuras sometidas a ciclos térmicos.

Si observamos en la Figura 7 b) el comportamiento del módulo de elasticidad de las probetas ensayadas a 22°C, se aprecia esa tendencia negativa anteriormente comentada, observándose una drástica disminución al inicio de los ensayos.

El resto de graficas tanto para los ensayos realizados a 70 (Figura 7 c)), como a -1°C (Figura 7 d)), muestran valores relativamente estables con respecto del tiempo, por lo que se entiende que no existe relación entre los valores de elasticidad y los ciclos térmicos.

4.4 Evolución de las densidades de deformación en régimen elástico en función del tiempo.

La evolución de la densidad de deformación elástica, parece mostrar un comportamiento cíclico que corresponde con los ciclos térmicos. Además se puede observar una disminución drástica del valor de energía al inicio del ensayo para luego oscilar en valores cuya tendencia es nula.

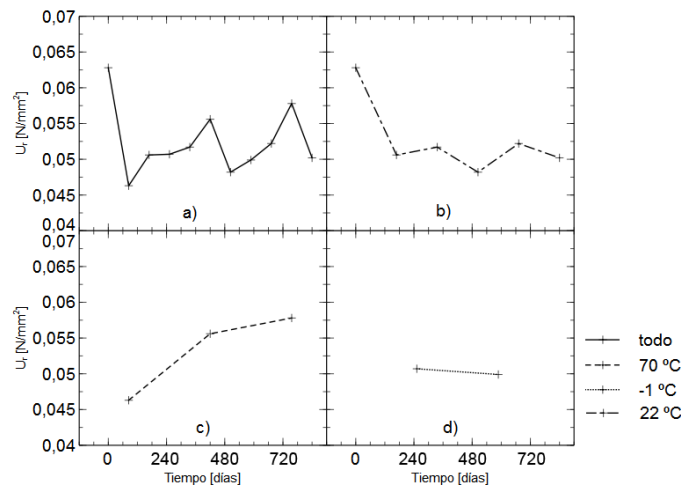


Figura 9: a) evolución temporal de la densidad de deformación elástica en todo el conjunto de datos, b) solo de aquellos que han sido ensayados a 22°C, c) los ensayados a 70°C, d) los ensayados a -1°C

Al analizar los valores de densidad de deformación agrupados por la temperatura de ensayo, se muestra una gráfica de las probetas ensayadas a 22°C igualmente oscilante pero difícil de interpretar (Figura 9 b)), aunque la tendencia general marcada es descendente. Puede que exista una cierta evolución negativa de la deformación en función de los ciclos térmicos.

Sin embargo para los ensayos realizados a 70°C (Figura 9 c)), se aprecia una clara tendencia ascendente, por lo que la densidad de deformación aumenta a medida que es sometido a ciclos térmicos.

Si observamos la gráfica de las probetas ensayadas a -1°C (Figura 9 d)), se observa una estabilidad, por lo tanto parece que los ciclos térmicos no influye en la densidad de deformación elástica del hormigón cuando es ensayada a una temperatura de -1°C.

4.5 Evolución de las energías de deformación en régimen plástico en función del tiempo.

En la Figura 10 a) para la densidad de deformación en régimen plástico parece observarse unos valores oscilantes, sin pendiente alguna. Si analizamos la gráfica para los datos ensayados a 22°C (Figura 10 b)) se observa que carece de pendiente por lo que las oscilaciones giran en torno a valores 0,013 N/mm^2 . Sin embargo para los datos recogidos a 70°C y a -1°C las gráficas son asimilables a los valores de las deformaciones últimas observadas, por lo que su análisis resulta el mismo.

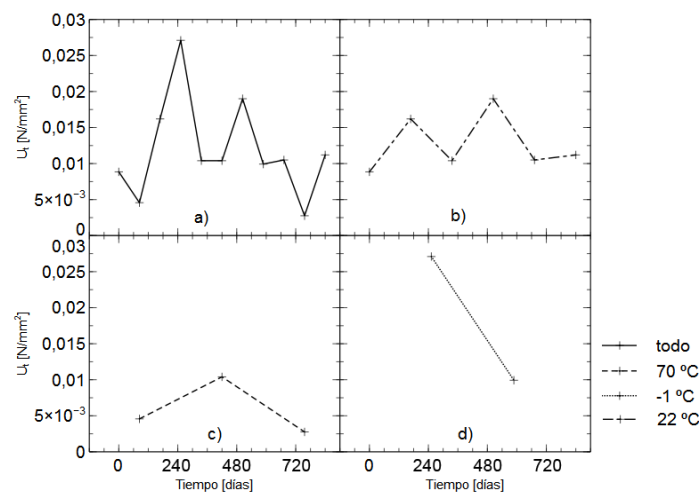


Figura 10: a) evolución temporal de la densidad de deformación plástica en todo el conjunto de datos, b) solo de aquellos que han sido ensayados a 22°C, c) los ensayados a 70°C, d) los ensayados a -1°C

5. CONCLUSIONES

De manera general, se puede decir que la temperatura a la cual se realiza el ensayo influye en la evolución de los factores analizados en función de los ciclos térmicos. Además, se puede apreciar que las características analizadas varían en función del tiempo, esto quiere decir que sus propiedades no se mantienen constantes cuando son sometidos a ciclos de temperaturas.

Las resistencias medias a compresión obtenidas en los ensayos sometidos a ciclos térmicos, no se encuentran representadas en los estudios previos sobre el comportamiento del hormigón a diferentes temperaturas. Además se aprecia una disminución del valor de resistencia en función del tiempo que comparado con el valor previo a los ciclos térmicos es un 17,8% inferior. Por tanto se considera necesario aumentar el coeficiente de minoración de las resistencias características del hormigón, proponiendo una sustitución del coeficiente γ_c que marca la Instrucción del Hormigón Estructural [6] en el artículo 15º como situación permanente o transitoria de 1,5 por 1,86 en los casos en que la estructura se encuentra termoactivada, para poder seguir manteniendo el mismo margen de seguridad que cualquier otra estructura de hormigón.

Los valores de las deformaciones tanto últimas como de rotura, muestran que cuando las probetas son ensayadas a 22°C y a -1°C, se aprecia una disminución de las deformaciones unitarias con el tiempo. Sin embargo cuando las probetas son ensayadas a 70°C las deformaciones unitarias aumentan con el tiempo. La disminución de los valores de deformación tanto última como de rotura, deben ser tenidas en cuenta en el análisis de las estructuras termoactivas, puesto que una disminución de la deformación produce una reducción de la posición de la fibra neutra en el interior de la sección de hormigón, lo cual genera una disminución del volumen del bloque comprimido absorbido por el hormigón, y por tanto sería necesario aumentar el área de acero trabajando a compresión para menores solicitaciones. En resumen, una reducción de la deformación implica una mayor cantidad de acero en el interior de la sección para poder seguir trabajando.

La disminución del valor del módulo de deformación, influye en el cálculo de la flecha instantánea, aumentando la flecha para los mismos valores de carga, luz entre apoyos, e inercia equivalente. Además el modelo indicado por la EHE no corresponde con el comportamiento observado, por lo que se debe de establecer un nuevo modelo que tenga en cuenta los ciclos térmicos.

6. REFERENCIAS

- [1] Brandl, H., 2006, “*Energy foundations and other thermo-active ground structures*”. Geotechnique, 56(2), 81-122.
- [2] Adam, D. *et al*, 2009, Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. Géotechnique, 59(3), 229-236.
- [3] Naus, D., 2010, In Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Office of Nuclear Regulatory, Laboratory. O. R. N. (Eds.), *A compilation of elevated temperature concrete material property data and information for use in assessments of nuclear power plant reinforced concrete structures*. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.
- [4] Laloui, L. *et al*. (2011). “*Understanding the behaviour of energy geo-structures*”. Proceedings of the ICE-Civil Engineering, 164(4) 184-191.
- [5] Aslani, F., & Bastami, M. (2011). “Constitutive relationships for normal-and high-strength concrete at elevated temperatures”. ACI Materials Journal, 108(4)
- [6] CPH., 2008, “*Instrucción del hormigón estructural EHE-08*”. Madrid, Ministerio De Fomento, Secretaría General Técnica,